

*Araştırma Makalesi - Research Article*

## Rijitleştirme Levhaları ile Güçlendirilmiş Silindirik Çelik Siloların Yapısal Davranışının İncelenmesi

Mehmet Erkan Efe<sup>1\*</sup>, İlyas Devran Çelik<sup>2</sup>

*Geliş / Received: 27/05/2020*

*Revize / Revised: 19/07/2020*

*Kabul / Accepted: 14/09/2020*

### ÖZ

Silolar dışarıdan veya içeriden gelebilecek her türlü etkiye karşı doluluk oranlarına göre farklı reaksiyonlar gösterebilen ince kesitli narin yapılardır. Silo yapıları farklı depolama ihtiyaçları için farklı malzemeler ile farklı büyüklüklerde üretilebilmektedirler. Büyük çaplı silolarda yapı ağırlığının büyük kısmını depolanan materyal oluşturmaktadır. Taşıyıcı sistem ağırlığına kıyasla boyutları ile öne çıkmaktadır. Büyük çaplı silolarda boyutsal parametreler göz önüne alındığında dış etkenlerden başlıca rüzgâr gibi çevresel etkenler yapıya büyük bir yük etkilemektedir. Öte yandan, depolanan materyalin karakteristik özellikleri içsel etkiler üzerinde büyük bir etken durumundadır. Sıvı depolaması için başlıca sorun teşkil eden problemlerden bir tanesi, sıvı depolanmasında meydana gelebilecek dinamik bir yük olan çalkantı durumudur. Bu çalışma kapsamında silindirik, çelik sıvı depolama siloları sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Silo yüksekliğinin eşit tutulduğu üç farklı çap boyutunda aynı sıvı yüksekliği için oluşturulan farklı kombinasyonlarda rijitleştirme levhalara sahip on iki sayısal model oluşturulup statik yük koşulları altında sayısal analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiş olup levha etkinliklerinin kombinasyonlar arasında ve çap farklılıklarına göre değişimi yorumlanmıştır. Analizler sonucunda çalışmada dikkate alınan rijitleştirme levhalarının etkinliğinin silo çapı ile arasında boyutsal bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak silo çapı ile birlikte levha boyutlarının (boyut ve cidar kalınlığı) da değiştirilmesinin yapı rijitliğine katkı sağlayacağı önerilmektedir.

**Anahtar Kelimeler-** Silo Yapıları, Doğrusal Olmayan Analiz, Sonlu Elemanlar Modeli ile Analiz, Silolarda Deprem ve Rüzgâr Yükleri

<sup>1\*</sup>Sorumlu yazar iletişim: [mefe3234@gmail.com](mailto:mefe3234@gmail.com) (<http://orcid.org/0000-0001-8198-9997>)

<sup>2</sup>İletişim: [devrancelik@sdu.edu.tr](mailto:devrancelik@sdu.edu.tr) (<http://orcid.org/0000-0001-9011-4041>)

<sup>1</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye

## Investigation of Structural Behavior of Cylindrical Steel Silos Reinforced with Stiffening Plates

### ABSTRACT

Silos are slender structures with thin sections that can react differently according to the fullness ratios against any impact that may come from inside or outside. Silo structures can be manufactured in a variety of materials and sizes for different storage needs. In large diameter silos, most of the weight of the structure is the stored material. The load carrying system stands out with its dimensions rather than its weight. Considering the dimensional parameters of large diameter silos, external factors, such as wind affects the structure highly. On the other hand, the type and characteristics of the stored material changes the internal loading conditions drastically. One of the main problems of these situations is the sloshing, which is a dynamic load that can occur in fluid storage. In this paper, cylindrical steel liquid storage silos are discussed. Twelve numerical models with different plate combinations created for three different diameter sizes are created with the consideration of same amount of stored liquid and silo height for all models. Created models are analyzed under dynamic and static loads. The results of the analysis are examined comparatively, and the variation of plate efficiency between combinations and diameter differences are interpreted. From the analysis results, it has been determined that the effectiveness of the stiffening plates is in dimensional relation with the silo diameter. In conclusion, it is suggested that altering the plate dimensions (size and thickness) along with the silo diameter will contribute to the rigidity of the structure.

**Keywords-** *Silo Structures, Non-Linear Analysis, Finite Element Model Analysis, Wind and Quake Loads in Silos*

## I.GİRİŞ

Sıvı depolama tankları genel ve endüstriyel alanlarda önemli bir yer tutmaktadırlar. Kentsel su depolaması ve yangın karşıtı sistemlerde kritik bir öneme sahiptirler. Pek çok endüstriyel alanda kimyasalların ve diğer sıvıların depolanmasında yer almaktadırlar.

Silo tipi yapıların geometrileri ve taşıyıcı sistem tasarımları, depolanması planlanan sıvı veya katı materyalin özelliklerine göre değişiklik gösterebilmektedir [1].

Duvar yüksekliği boyunca oluşan kuvvetlerin büyüklükleri ve dağılımları, depolanan materyalin özelliklerine ve silonun doldurulma veya boşaltım aşamasında olmasına bağlıdır. Ayrıca tasarım aşamasında deprem, rüzgâr, silo yüzeyi ve depolanan malzeme arasındaki sıcaklık farkı, depolanan içeriğin potansiyel şişmesi gibi durumlardan kaynaklanabilecek gerilmelere karşı dikkat edilmelidir [2].

İnce oluklu duvarlı silindirik metal silolar genellikle silo çevresine üniform olarak yerleştirilen dikey rijitleştiriciler ile güçlendirilirler. Bu tip silolarda yatay oluklu duvarlar, yatay duvar sürtünmelerinden oluşan çekme kuvvetlerini taşımaktayken, dikey kolonlar yığın katıların sürtünme çekişi sonucu dikeyde oluşturduğu basınç kuvvetlerini taşımaktadır. Burkulma sorunları dikey duvar yüklerinden kaynaklanmaktadır. İnce duvarlı silindirik silolar, duvar burkulmasını önleyen, rüzgâr ve deprem kuvvetlerine karşı rijitlik sağlayan dikey rijitleştiriciler olmadan nadiren kullanılmaktadır [3].

Depolanan materyal yapıda hidrostatik, yatay ve dikey ve basınç etkileri oluşturmaktadır. Tank içerisinde meydana gelebilecek etkilerin en önemlilerinden biri sıvı çalkantısıdır. Sıvı çalkantısı çeşitli dinamik sistemlerde mühendislik problemleri oluşturabilmektedir. Tam dolu olmayan tanklarda, tankın hareket periyodu tankın doğal titreşim periyoduna yaklaştığında, çalkalanma etkisi başlamaktadır. Bu sebeple, çalkalanma hareketinin başlayacağı periyot değerlerinin belirlenmesi önemlidir. Çalkantı hareketi serbest sıvı yüzeyinin bulunduğu her tankta meydana gelebilir. Tankın şekli ve dağılıma bağlı olarak serbest sıvı yüzeyi; simetrik, asimetrik, rasgele çarpışmalar, yarı periyodik ve kaotik gibi birçok şekli olabilir. Çalkantı hareketinin genliği tank hareketinin frekansına ve genliğine, sıvı derinliğine, sıvının mekanik özelliklerine ve tank geometrisine göre değişkenlik gösterebilmektedir [4].

Deneyisel çalışmalarda perde (levha) kullanımının ve perde yerleşimlerinde yapılan düzenlemelerin tanker duvarlarındaki ortalama ve maksimum basınçları azalttığına ve perdelerin yatay ve dikey olarak birlikte kullanıldıkları durumda daha verimli olduğuna değinmişlerdir [5]. Hareketlendirme parametrelerinin sistematik değiştirildiği bir çalışmada perdelerin sıvı hareketini düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, çalkantı esnasında en yoğun darbelerin serbest sıvı düzeyinde veya tank duvarındaki dik kesişimlerde meydana geldiğine ve deneyel çalışmalarda sıvı viskozitesi ve çarpma basınçlarının göz önünde bulundurulmasının gerektiğine değinmişlerdir [6]. Tank içindeki çalkantı hareketinin, tank hareketinin, sıvı derinliği ve yoğunluğunun, tank şeklinin bir fonksiyonuna bağlı olduğunu araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen deneyler göstermiştir. Ayrıca tank içindeki çalkantı hareketi son yıllarda birçok çalışmada konu edinilmiştir [7-9].

Literatürde geçen araştırmalarda depolanan sıvının taban tarafında yapı ile birlikte hareketini gerçekleştirdiği, sıvı serbest yüzey tarafında ise periyodu yüksek bir hareket ile çalkalanmaya maruz kaldığına değinilmiştir [10].

Çalışmalarında, belirli bir hareket frekansı için sıvı serbest yüzeyindeki yerdeğiştirmenin maksimum olduğu durumun tankın doluluk oranının az olduğu bir durum olduğuna yani sıvı yüksekliği arttıkça çalkantının azaldığına değinmişlerdir. Bu duruma sebep olarak duvarlara gelen etkiyi azaltan, sıvının kendini sönümlenme özelliğini göstermişlerdir. Ayrıca belirtmişlerdir ki, problemin non-linear olan doğası analitik ve sayısal bir çözüm üretilmesi konusunda zorluklar çıkartmaktadır. Bu sebeple bazı varsayımlarda bulunmak gerekmektedir. Bu durum ise elde edilen verileri gerçek durum ve sonuçlardan biraz uzaklaştırmaktadır. Bu sebepten dolayı deneyel çözümler çalkantı hareketinin incelenmesinde büyük bir rol oynamaktadır [11].

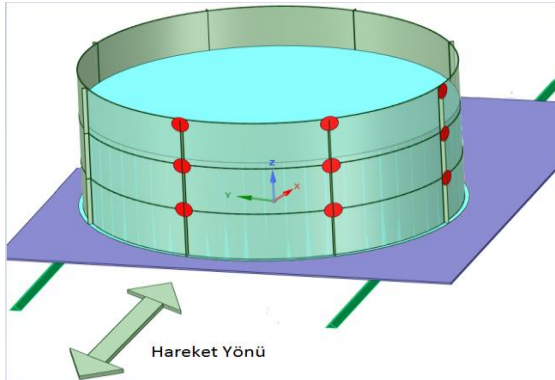
Rezonans durumundaki sıvı çalkantısının yapısal stabilite ve saklama yapısının duvarları için risk oluşturabilmektedir. Gözenekli levhalar ile çalkantı durumuna karşı enerji sönümlenmesinin yapılabileceği ve çalkantı hareketinin duvarlara uygulayabileceği kuvvetin azaltılabileceğine değinmişlerdir [12].

Yapmış oldukları çalışmada sabit çap ve yükseklik için farklı levha yerleşimlerini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Analizleri sonucunda silo geometrisine yakın bir geometride levha kullanımının daha eşdağılımlı bir sonuç verdiğine değinmişlerdir. Sadece düşey levha kullanımının olduğu modelde davranışın bozulduğunu, yatay levhaların şekil değiştirmeyi sınırladığını ve en uygun sonuçların yatay ve düşey levhaların birlikte kullanıldığı durumlardan elde edildiğini belirtmişlerdir [13].

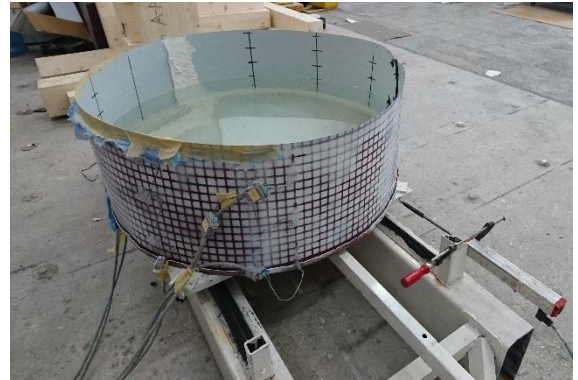
Çalışmamızda silo tipi bir çelik yapı farklı boyut ve yerleşim düzenindeki rijtleştirme levhalarının birer kombinasyonu halinde güçlendirilmiştir. Kullanılmış olan levha boyutları ve yerleşim şekilleri için elede edilen sonuçlar kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Analizlerde silo yüksekliği, sıvı yüksekliği ve levha özellikleri sabit tutulmuş olup silo modellerinin çapları büyütülmüştür. Aynı çap grupları kendi içlerinde seri olarak adlandırılmıştır. Modeller çap serileri ve levha kombinasyonları baz alınarak grafiklerle karşılaştırılmıştır.

## II.MATERYAL VE YÖNTEM

Sayısal ve deneysel olarak yapılan bu çalışmada; sarsmatablası kaynaklı hareketlenmeye maruz kalan silo tipi çelik yapıların sıvı çalkantısına bağlı yapısal davranışın incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla; silo yapısında maksimum çalkantı hareketini sağlayacak olan etkin su seviyesini belirleyebilmek için deneysel bir model oluşturulmuştur. Yapılan deneysel çalışmada kullanılan model boyutları 400mm yükseklik ve 1000mm çap için 0,5mm cidar kalınlığındaki S235 çelik sınıfına sahip uniform saç malzemeden tasarlanmıştır. Şekil 1'de oluşturulan deneysel modelin genel görünümü verilmiştir.



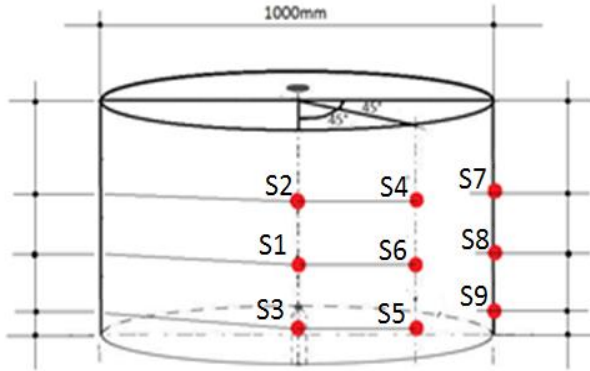
Deneyisel model



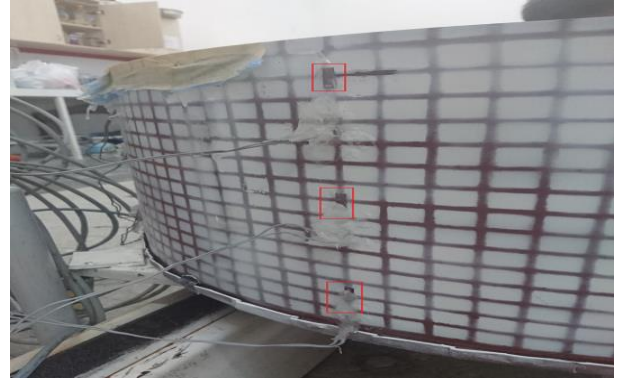
Deneyisel model genel görünüm

Şekil 1. Deneyisel modelin genel görünümü

Silo tipi bir yapıda su seviyesine bağlı dalga /yapı etkileşimi için en olumsuz durumların ortaya konulabilmesi için oluşturulan deneysel analizde sarsma tablası kullanılarak farklı su seviyeleri için dalga kuvveti üretilmiştir. Silo cidarında meydana gelen deformasyonların sayısal model ile karşılaştırılabilmesi ve yapısal davranışın ölçeklendirilebilmesi için deneysel model dış cephesi boyanarak sonlu parçalara ayrılmıştır. Sayısal modelin kalibrasyonunun sağlanabilmesi için ayrıca model dış yüzeyine gerinim ölçer pullar yapıştırılarak, etkiyen dalga yükü altında silo cidarındaki şekil değiştirmeler tespit edilmiştir. Şekil 2'de gerinim ölçer pullarının yerleşim düzeni verilmiştir.



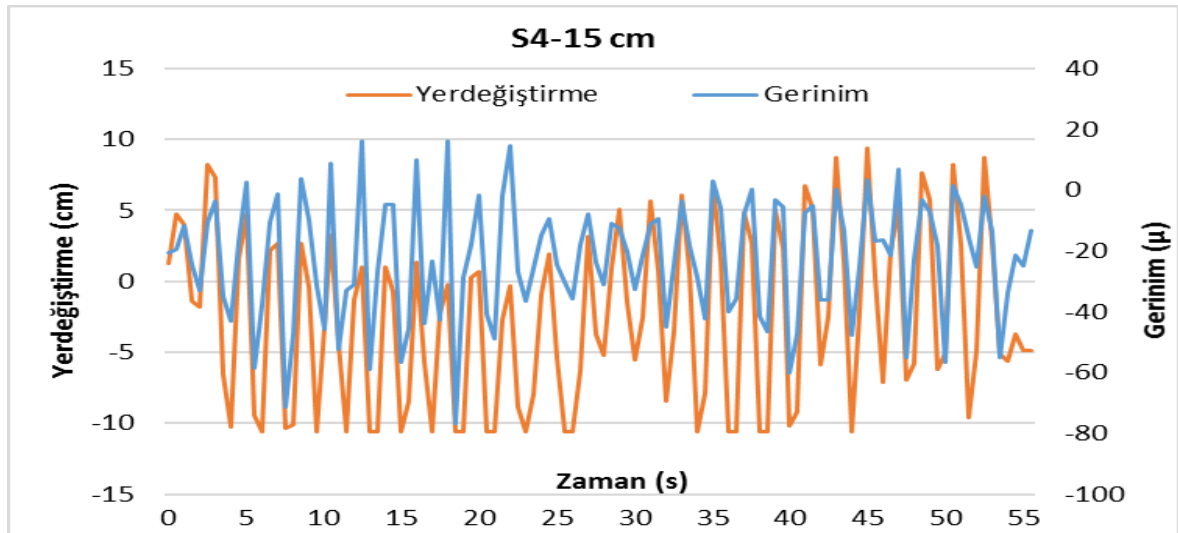
Deneysel model gerinim pulu yerleşim düzeni



Silo cidarındaki tek yönlü gerinim pulları

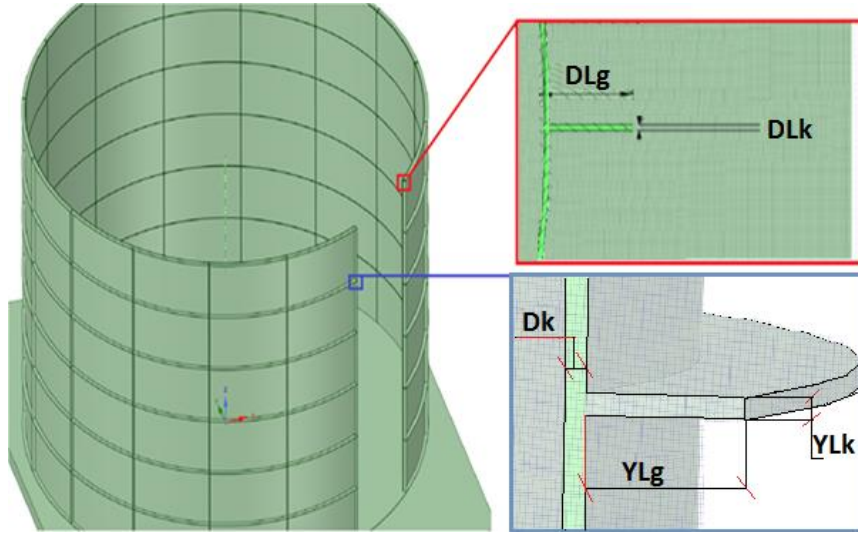
Şekil 2. Gerinim pullarının yerleşim düzeni

Dalga kuvveti altında silo cidarındaki şekil değiştirmeyi temsil etmek için dokuz farklı gerinim ölçer 3 farklı eksen üzerinde maksimum şekil değiştirmenin beklendiği yön ve durum dikkate alınarak yerleştirilmiştir. Deneysel analizde dalga kuvveti yerdeğiştirme kontrollü olarak manuel olarak uygulanmıştır. Sarsma tablasına yerleştirilen deplasman okuyucular kullanılarak yatay yerdeğiştirmeler belirlenen zaman aralığı için tespit edilmiş olup, bu veriler üzerinden yükleme protokolü ivme değerleri elde edilmiştir. Bu kapsamda sarsma protokolleri farklı su seviyeleri için, düşük ve yüksek frekanslı hareket meydana getirecek şekilde oluşturulmuştur. Yükleme protokollerinde su seviyeleri sırasıyla yaklaşık %15 lik artışla 50mm, 100mm, 150mm, 200mm ve 250mm olarak belirlenmiş ve dalga yükü elde edilmiştir. Yapılan dalga analizi sonucunda farklı su seviyeleri için silo cidarında meydana gelen şekil değiştirmeler verilmiştir. Grafikler sarsma tablası yerdeğiştirme (deplasman) değerine karşılık silo cidarındaki şekil değiştirmeyi temsil etmektedir. Şekil 3'te yapılan ölçümler içinde x eksenin de yer alan maksimum şekil değiştirmenin tespit edildiği S4 No'lu gerinim pulu için ölçülen değerler verilmiştir. Burada 15 cm'lik değerler su seviyesini belirtmektedir.



Şekil 3. X eksenli yerdeğiştirme gerinim grafiği

Çalışmanın sayısal analizleri Ansys Work Bench sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılmıştır. Programda deneysel model, kullanılarak oluşturulan sayısal algoritmanın doğruluğu teyit edilmiştir. Deneysel analiz sonuçları kullanılarak doğruluğu ispatlanmış matematik model Şekil 4’te tanımlanan boyutsal parametreler için çözümlenmiştir. Çalışmada yatay ve düşey levhaların yapısal davranışa etkisinin irdelenmesi için kullanılan tüm boyutsal parametreler verilmiştir.



Şekil 4. Rijitleştirme levhalarının boyutsal parametreleri [14]

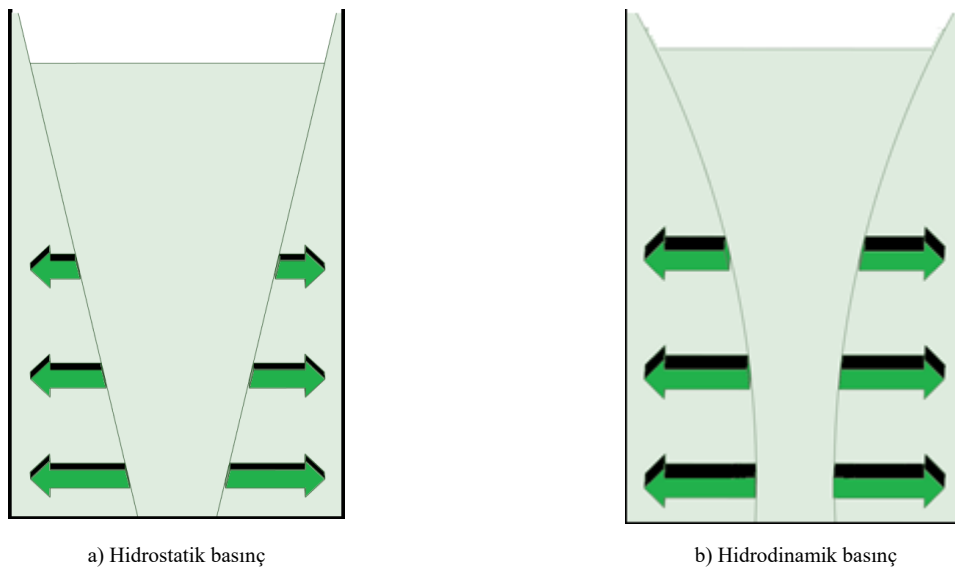
Çalkantı etkisi altında meydana gelen dalga kuvvetinin silo cidarında daha güvenli bir şekilde sönmülmesini sağlamak amacı ile kullanılan rijitleştirme levhalarının yapısal davranışa etkisini inceleyebilmek için yerleşim düzeni bakımından farklı kombinasyonlar oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan tüm sayısal modellerde silo cidarı 20mm alınmış ve bu değer sabit tutulmuştur. Rijitleştirme halkaları için kullanılan levha genişlikleri hem düşey hem de yatay levhalar için  $DLg/ YLg=150mm$ , levha kalınlıkları ise  $DLk/YLk=20mm$  olarak modellenmiştir (DL: Düşey levha, YL: Yatay levha, D: Duvar).

Düşey levha ve yatay levhaların davranışa farklılıkları ortaya koyabilmek için yerleşim şekilleri şu şekilde düzenlenmiştir. Yatay levha yerleşim şekli sabit 12m yükseklik için 2m ve 1m arkalıkla 6 ve 12 adet kullanılmıştır. Düşey levha yerleşim düzeni ise dairesel planda 8 ve 16 adet kullanılarak tasarlanmıştır. Farklı çap durumu, sabit yükseklik için levha yerleşim sayıları kendi içlerinde kombinasyon oluşturularak toplamda 12 model oluşturulmuştur. Tablo 1’de çalışmada kullanılan sayısal modellerin boyutsal parametreleri ve isimlendirmeleri gösterilmiştir.

Tablo 1. Model parametreleri

Model No.	Düşey Levha Sayısı(Adet)	Yatay Levha Sayısı(Adet)	DLg (mm)	YLg (mm)	Su Seviyesi (mm)	YLk (mm)	DLk (mm)	Dk (mm)	Çap (mm)	Yükseklik (mm)
S12	-	6	-	150	7000	20	20	20	12500	12000
S13	8	6	150	150	7000	20	20	20	12500	12000
S15	8	12	150	150	7000	20	20	20	12500	12000
S16	16	12	150	150	7000	20	20	20	12500	12000
S22	-	6	-	150	7000	20	20	20	17500	12000
S23	8	6	150	150	7000	20	20	20	17500	12000
S25	8	12	150	150	7000	20	20	20	17500	12000
S26	16	12	150	150	7000	20	20	20	17500	12000
S32	-	6	-	150	7000	20	20	20	25000	12000
S33	8	6	150	150	7000	20	20	20	25000	12000
S35	8	12	150	150	7000	20	20	20	25000	12000
S36	16	12	150	150	7000	20	20	20	25000	12000

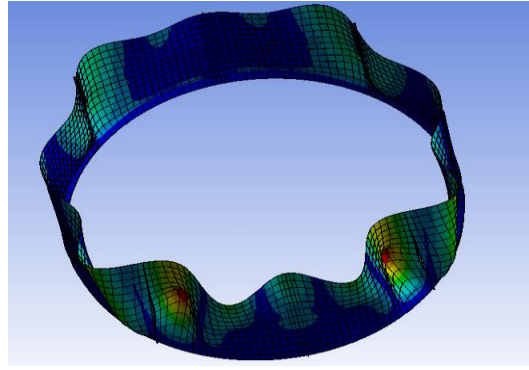
Sayısal analizlerde %60 doluluk için sismik yük altında hesaplanan dalga kuvveti, statik olarak silo cidarına uygulanmıştır. Yük değerlerinin uygulama şeklinde Hidrostatik ve hidrodinamik basınç etkisi altındaki silindirik çelik su tanklarının tasarımın teorisi dikkate alınmıştır. Hidrostatik su basıncı, sıvı yüksekliğince artarak değişen basınç gerilmesi olarak etkir ve Şekil 2’de görüldüğü üzere sıvının üstünden herhangi bir noktaya olan yüksekliğe ve yoğunluğa bağlı olarak artan bir dağılımda etkimektedir. Ancak taban hareketine bağlı olan hidrodinamik basınç etkisi ise eğrisel bir dağılım ile silo yüzeyine etkimektedir.



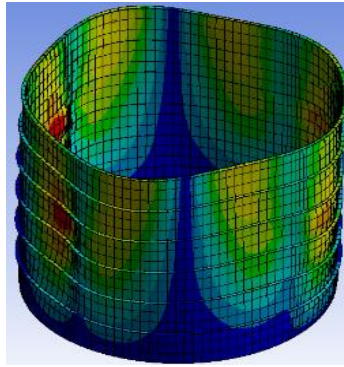
Şekil 5. Dinamik ve statik su basıncının etkimesi a) hidrostatik basınç durumu b) hidrodinamik basınç durumu

### III.ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

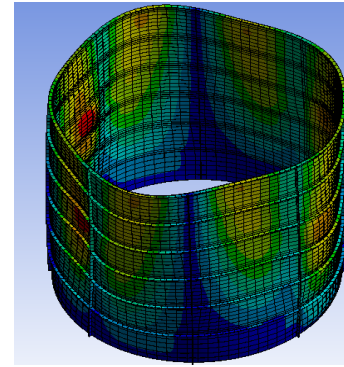
Dalga yükü etkisi altındaki silo tipi su tankının yapısal davranışının incelendiği bu çalışmada silo cidarındaki rijitliği artırmak ve deformasyonları kontrol altına almak için düşey ve yatay yönde rijitleştirme levhaları kullanılmıştır. Rijitleştirme levhaların yerleşim şekli ve sayısına göre yapısal davranışların irdelenebilmesi için, tüm modellere ait deforme olmuş durumlar, yükler, cidardaki yerdeğiştirmeler ve cidar gerilme değerleri hesaplanmıştır. Tüm modeller literatürde “M” tipi davranış olarak geçen davranışa eğilim göstermektedir. Şekil 6’da ifade edilen davranış; silo cidarında meydana gelen şekil değiştirmenin “M” harfine benzemesi sebebiyle kullanılmaktadır. Bu kapsamda çalışmada kullanılan modellerden 12,5m çap, 12m yüksekliğe sahip S1 serisine ait deforme olmuş durumlarına ait görseller Şekil 7’de verilmiştir.



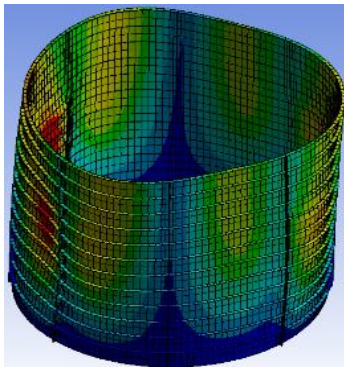
Şekil 6. M tipi deformasyon görünümü



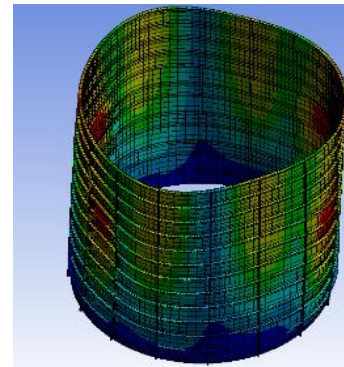
S12



S13



S15



S16

Şekil 7. S1 serisine ait deformasyon durumları

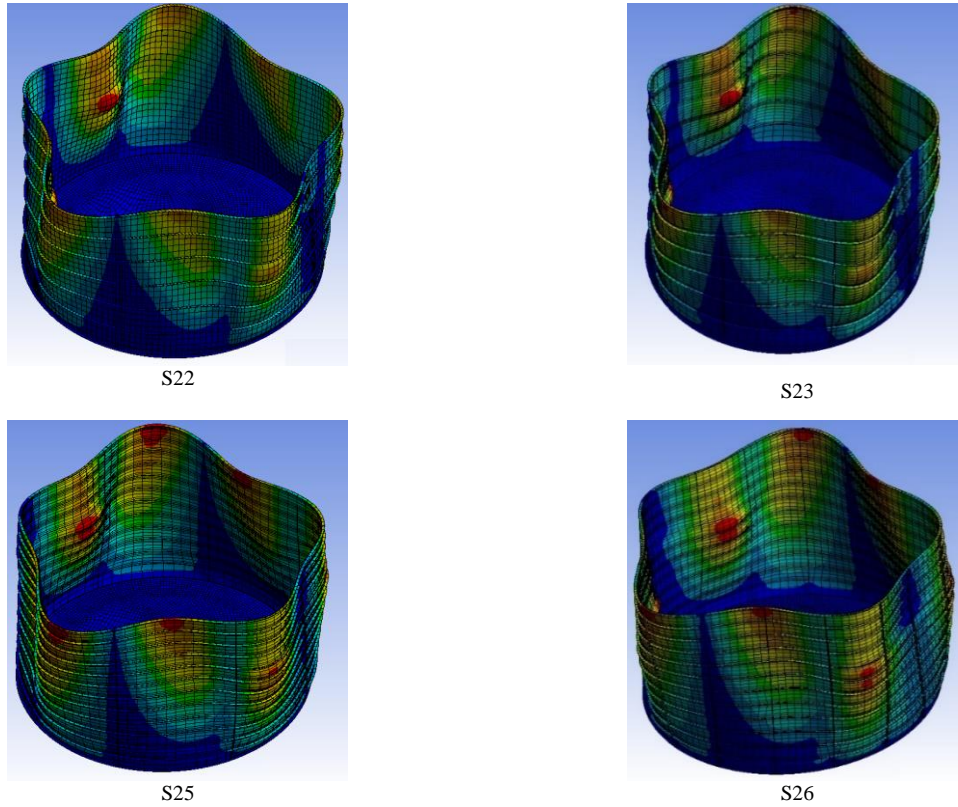


Deforme olmuş durumlar kıyaslandığında kombinasyonlar arasındaki rijitlik farkı deformasyonlar aracılığı ile açıkça görülmektedir. Bu durum sayısal modeller için hesaplanan doğal titreşim periyotları değerlerince de teyit edilmektedir. Tablo2’de tüm modeller için yapılan modal analiz sonucunda elde edilen doğal titreşim periyotlarına ait ilk üç durum örneklendirilmiştir.

Tablo 2. Doğal titreşim periyotları (sn)

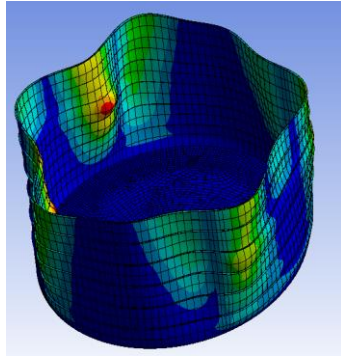
S12	S13	S15	S16
0,105982	0,102467	0,088472	0,084459
0,105696	0,100576	0,086222	0,084331
0,089638	0,088464	0,085778	0,082912

Çalışmada ikinci model olan 17,5m çap 12m yüksekliğindeki S2 serisi deforme olmuş duruma ait görünüm Şekil 8’te verilmiştir.

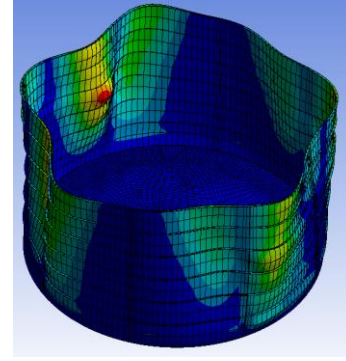


Şekil 8. S2 serisi deformasyon görünümüleri

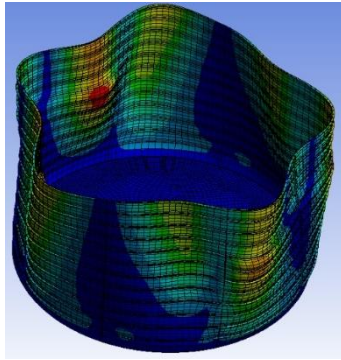
S2 serisine ait durumlar S1 serisi ile kıyaslandığında çap artışının bir sonucu olarak deformasyon durumlarının arttığı gözlemlenmiştir. S2 serisinde S1 serisine kıyasla “M” tipi davranış daha net görülebilmektedir. Özellikle S22 modelinde, düşey rijitleştiricilerin olmayışı bu davranışı engelleyememektedir. En fazla levha sayısının olduğu kombinasyona sahip olan S26 modeli ile S16 modelinin kıyaslanması çap artışıdaki farkı öne çıkarmaktadır. Çalışmanın çapça en büyük sayısal modeli olan S3 serisinde çap değeri 25 m, yükseklik 12 m’dir. Bu durum için elde edilen deformasyon haline ait görünüm Şekil 9’te verilmiştir.



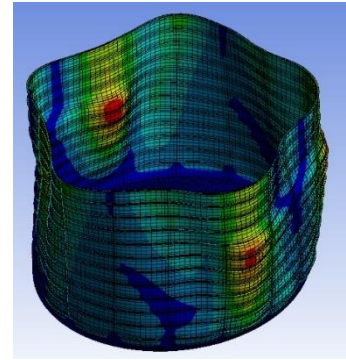
S32



S33



S35



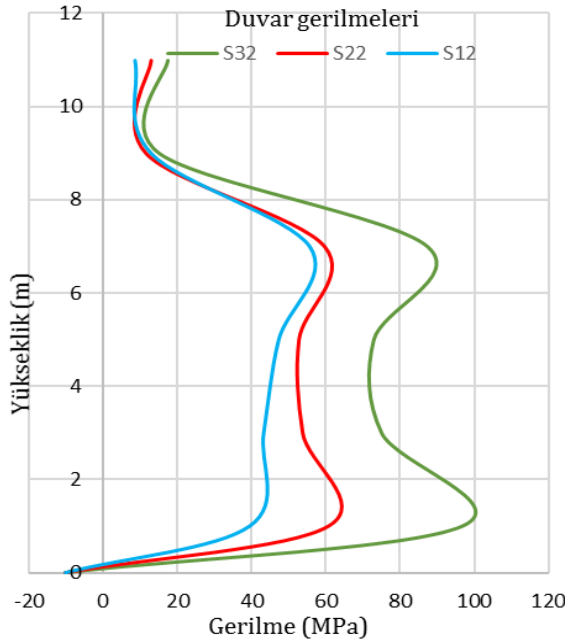
S36

Şekil 9. S3 serisi deformasyon görüntüleri

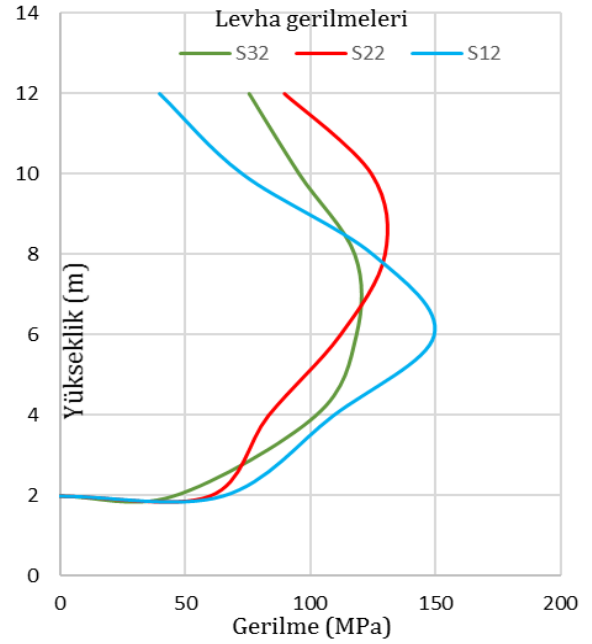
Şekil incelendiğinde çap büyüdükçe sadece yatay durumun tek başına yeterli olmadığı, yatay ve düşeyin birlikte kombine edilmesinin silo cidarındaki deformasyonların sönümlenmesinde daha etkin olacağı görülmektedir.

#### A. Sayısal Modellerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

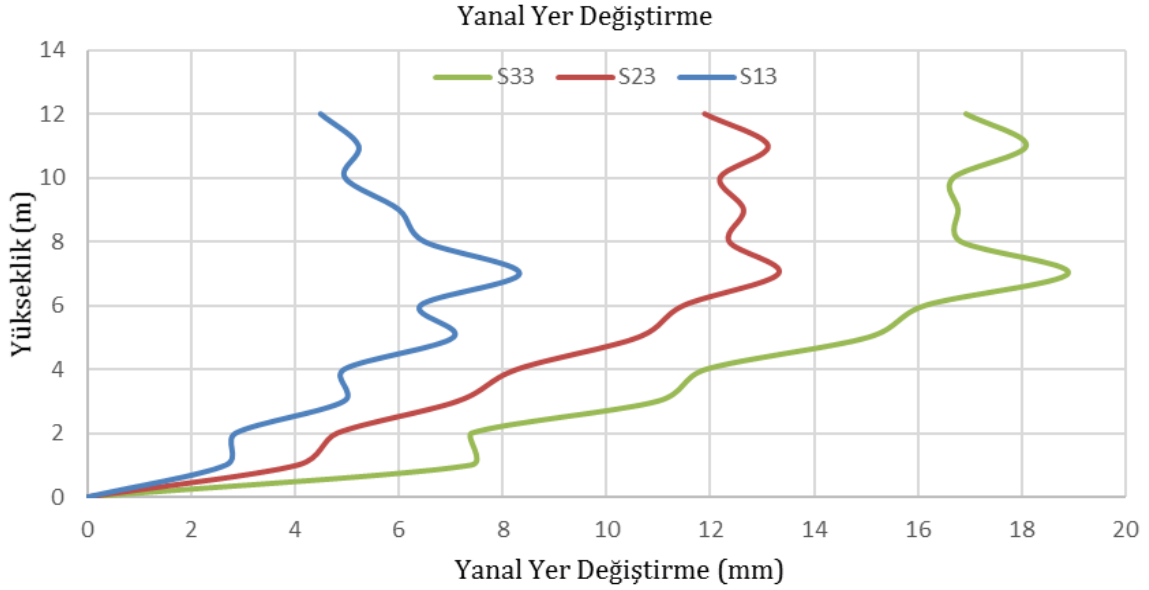
Tüm çap durumları için benzer kombinasyonları temsil eden modeller gerilme ve deformasyon durumlarınca şekiller ile gösterilmiştir. Şekil 10'da tüm çap durumları için 2 numaralı kombinasyon olan sadece yatay levha kullanımlarının olduğu modeller sunulmuştur.



a) 2 no'lu kombinasyon için duvar gerilmeleri



b) 2 no'lu kombinasyon için levha gerilmeleri



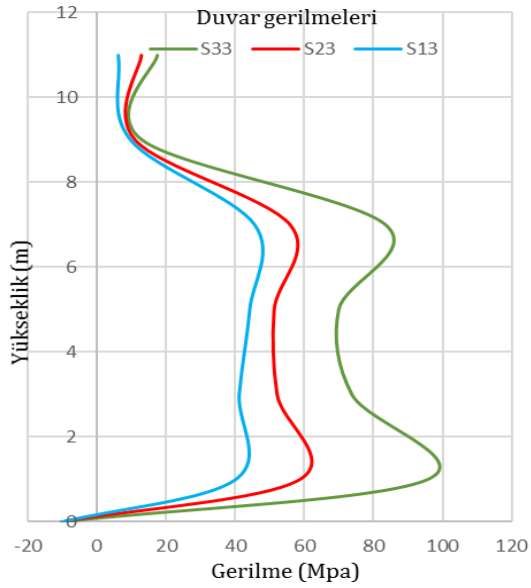
c) 2 no'lu kombinasyon için yanal yer değiştirme değerleri

Şekil 10. S12, S22, S32 modellerine ait grafikler a) duvar gerilmeleri, b) levha gerilmeleri, c) yanal yer değiştirme değerleri

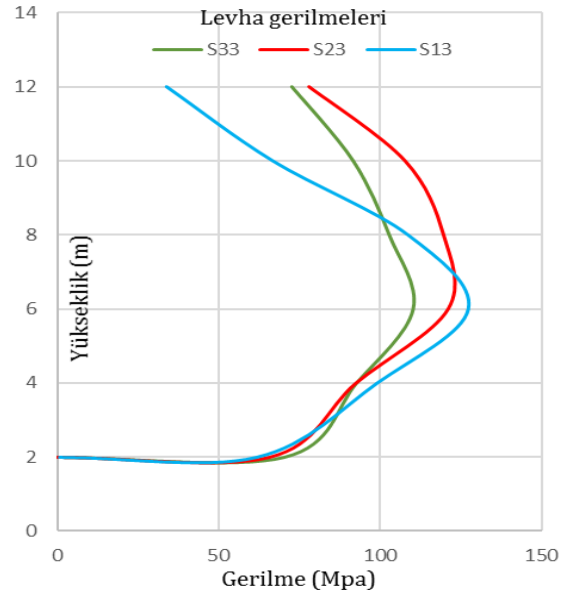
Elde edilen deformasyon değerleri incelendiğinde en az deformasyon beklendiği üzere en küçük çap olan S12, takiben S22 ve S32 modelinde görülmektedir. Deformasyonların silo yüksekliği üzerine dağılımları incelendiğinde silo çapındaki artış silo cidarı kaynaklı kazanılan atalet momentindeki azalmaya sebep olması ile sadece yatay kuşak kullanımının deformasyon sönümünü tam olarak karşılayamadığı deformasyon grafiklerinin zikzaklı bir dağılım göstermesinden anlaşılabilir. Grafiklerdeki zikzak, kullanılan yatay kuşağın kullanıldığı bölümlerde sağladığı rijitlik sebebi ile oluşmaktadır. Aynı durum gerilme dağılımlarının silo cidarındaki sonuçlarına da yansımıştır, ancak levhaların üzerindeki gerilme değerleri dikkate alındığında levhaların gerilme değerlerinin çaptan bağımsız olduğu görülmektedir. Bu durum levha üzerindeki gerilmenin

sahip olduğu atalet değerleri ile orantılı olarak karşılanması ile yorumlanabilir, yani tüm modellerde levha boyutları aynı kullanılmasına rağmen çap değerleri değişmiştir. Bu durum tüm modellerde çap boyutlarında artış olmasına rağmen levha boyutlarını yani bu boyutlara karşılık elde edilen ataletlerin aynı olması sebebi ile açıklanabilir.

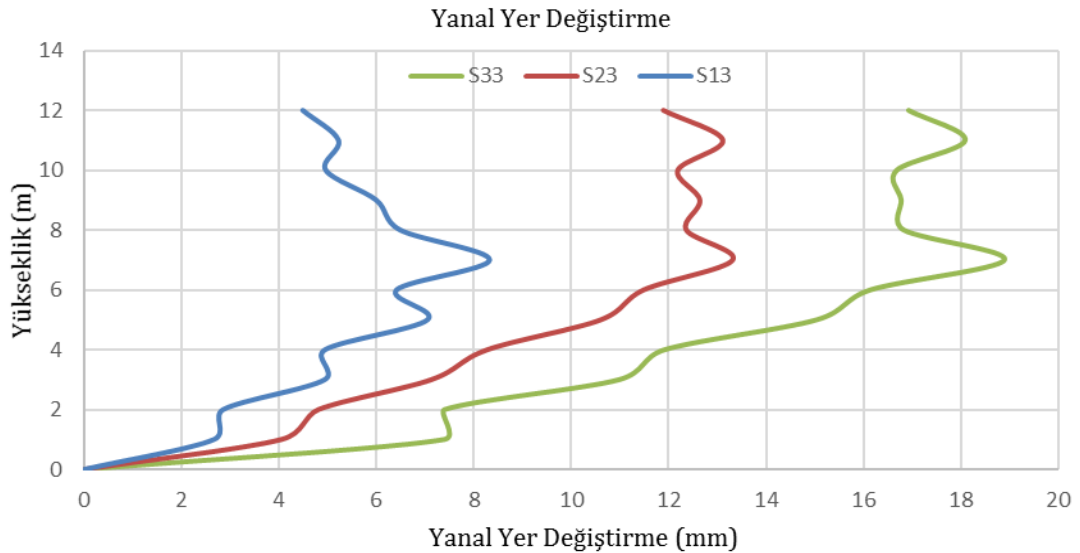
3 numaralı kombinasyona sahip dikey ve yatay levhaların kullanılmaya başlandığı sayısal modeller olan S13, S23 ve S33 modelleri için dalga yükü yapı etkileşimini değerlendirmek amacı ile gerilme ve deformasyon değerleri Şekil 11’de gösterilmiştir. Dikey ve yatay levhaların kullanımının sadece yatay levhaların kullanıldığı 2 numaralı kombinasyona göre yanall yer değıştirmeleri tutmada daha başarılı olduğu görülmüştür. Çap boyutunun yükselmesi ile yanall yer değıştirme ve duvar gerilmelerinde de artışlar gözlemlenmiştir.



a) 3 no’lu kombinasyon için duvar gerilmeleri



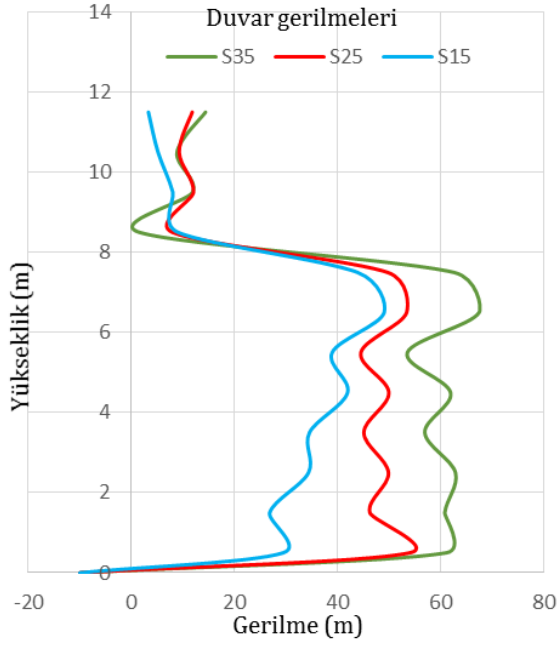
b) 3 no’lu kombinasyon için levha gerilmeleri



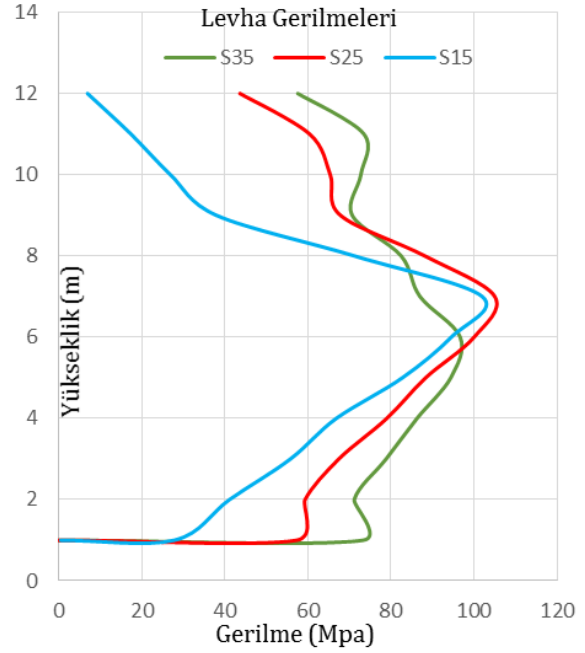
c) 3 no’lu kombinasyon için yanall yer değıştirme değerleri

Şekil 11. S13, S23, S33 modellerine ait grafikler a) duvar gerilmeleri, b) levha gerilmeleri, c) yanall yer değıştirme değerleri

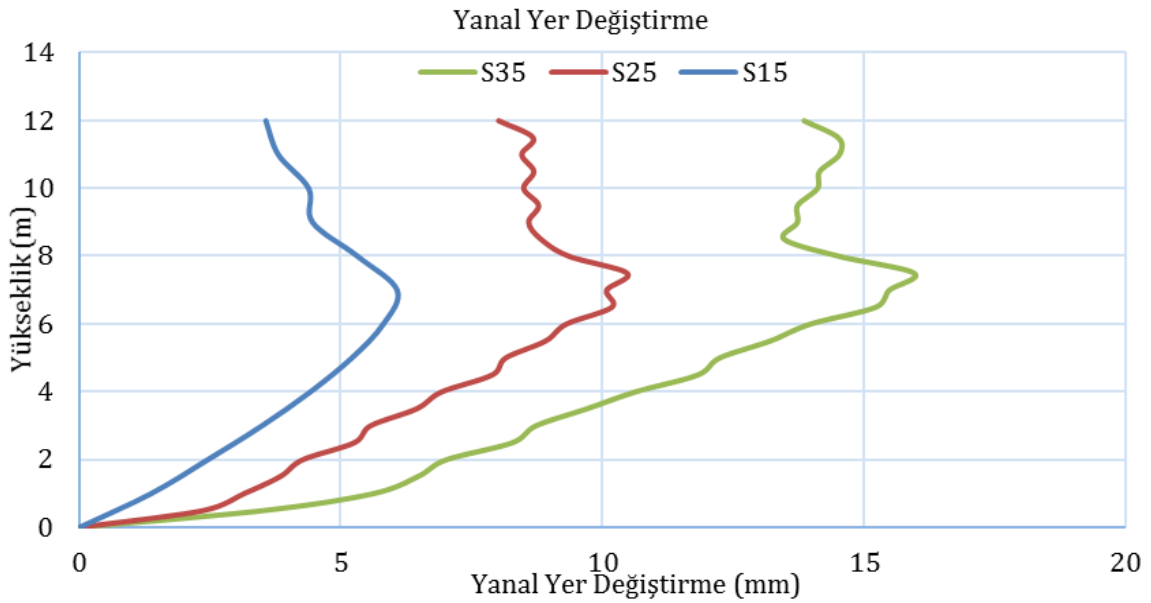
Şekil 12'de düşey ve yatay levhaların birlikte kullanıldığı 5 numaralı kombinasyona ait grafikler verilmiştir. Silo cidarı, yüksekliğince meydana gelen yanıl yer değıştirmelere ait grafikler incelendiğinde; sonuçların silo çapı değışimine göre farklılaştığı, çap büyüdükçe yapının yanıl yer değıştirme kabiliyetinin arttığı ve grafiklerin birbirlerinden ayrıştığıdır. Ancak bir önceki durumda olduğu gibi bu durumda da levha üzerinde meydana gelen gerilmeler çap değeri değışmesine rağmen özdeş ve aynı çizgidedir. Buradaki sebep silo çap değeri değışmesine rağmen levha boyutlarının sabit kalması ile açıklanabilir. Şekil 13'de düşey ve yatay levhaların birlikte kullanıldığı 6 numaralı kombinasyon için elde edilen grafikler verilmiştir.



a) 5 no'lu kombinasyon için duvar gerilmeleri

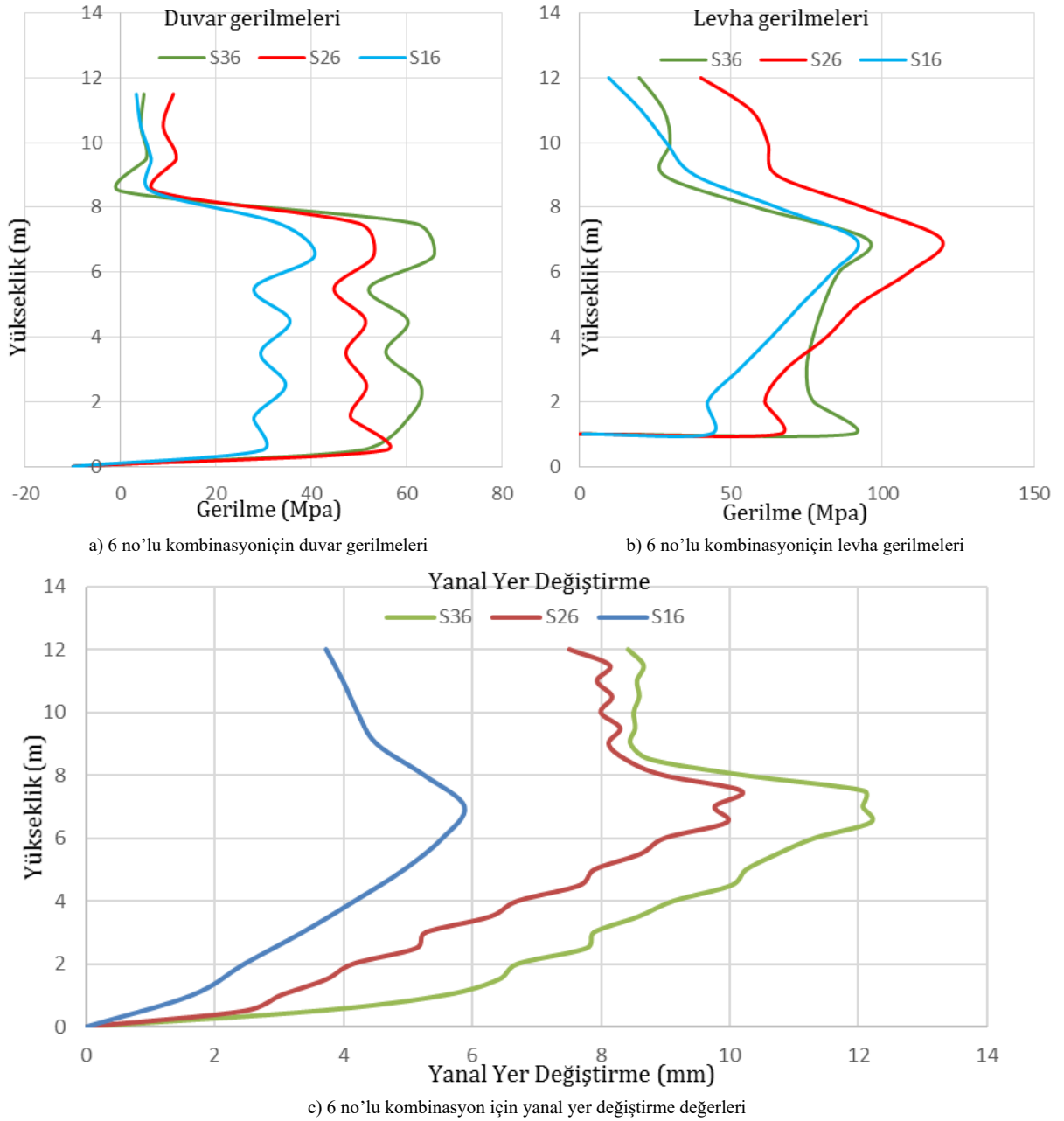


b) 5 no'lu kombinasyon için levha gerilmeleri



c) 5 no'lu kombinasyon için yanıl yer değıştirme değeri

Şekil 12. S15, S25, S35 modellerine ait grafikler a) duvar gerilmeleri, b) levha gerilmeleri, c) yanıl yer değıştirme değeri



Şekil 13. S16, S26, S36 modellerine ait grafikler a) duvar gerilmeleri, b) levha gerilmeleri, c) yanal yer değiştirme değerleri

Yatay ve düşey levhaların birlikte kullanıldığı en çok levha miktarına sahip 6 numaralı kombinasyona ait deformasyon verileri incelendiğinde yine en küçük çaplı durum olan S1 serisinin en az yer değiştirme değerini alarak S26 ve S36 dan ayrıştığı görülmüştür. S26 ve S36'nın birbirleri ile benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu durumdaki temel sebep, çap büyümesine karşın kullanılan levhaların boyutsal parametrelerinin aynı kalması olarak açıklanabilir. Bu sebeple düşey levha ve yatay levhalar kullanılarak rijitleştirilen silo cidarlarında çap değerlerinin artışı ile orantılı olarak levha boyutlarının da büyütülmesi gerektiği görülmektedir. Gerilme dağılımları için elde edilen sonuçlar incelendiğinde her iki durumda da bütün modellerde olduğu gibi dalga ile etkileşimde olan duvar çeperleri aynı çizgide dağılım göstermiş ve çapça en küçük olanlar minimum değerleri almıştır. Levha üzerindeki gerilme dağılımları incelendiğinde, çap büyüdükçe levha üzerindeki gerilmelerin zikzaklı bir çizgide değiştiği ve lineer sönümlenimin kaybolduğu görülmüştür.

#### IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yatay ve düşey levhaların yapısal davranışa etkisinin incelendiği bu çalışmada, önceki çalışmalarımızdaki analiz sonuçları göstermiştir ki sadece düşey levhaların kullanıldığı durumda silo çeperi yapısal davranışı literatürde M tipi şekil değiştirme ile benzeşen, verimsiz sonuçlar vermiştir. Bu sebeple sadece düşey levhaların kullanıldığı duruma ait sonuçlara çalışmada yer verilmemiştir. Elde edilen sonuçlara göre çalışma kapsamında sadece yatay ile yatay ve düşeyin birlikte kullanıldığı kombinasyonlar için elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir ve bunlara ait grafikler yorumlanmıştır.

Silo çapı farklılaşan yüksekliği sabit tutulan, aynı su seviyesi ve sabit dalga boyu için farklı kombinasyonların kullanıldığı modellerin sayısal analizlerin yapıldığı bu çalışmada, sistem düşey ve yatay yönde rijitleştirme levhaları ile güçlendirilmiştir. Sistem rijitliğini artırmak için kullanılan rijitleştirme levhalarının davranışa katkısının incelenmesi için düşey ve yatay elemanların(levhaların) yerleşim şekli ve sayısı değişken kabul edilerek 4 farklı kombinasyon için üç farklı silo çapı için 12 sayısal model ile analizler yapılmış şu sonuçlar elde edilmiştir;

Gerilme dağılımları bakımından değerlendirildiğinde yüksek sayıda yatay ve düşey levhanın kombine edildiği modeller genel olarak daha az gerilmeye maruz kalmıştır. Yatay ve düşey levhaların beraber kullanılması durumlarında deformasyon ve gerilme değerlerinin sadece yatay kullanılan durumlardan çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Yatay ve düşey levhaların S13 modeli ile başlayarak birlikte kullanılmaya başlandığı modeller içinde 5 ve 6 no'lu kombinasyonlar üç farklı çapa ait modellerin tümünde 3 no'lu kombinasyon karşılaştırıldığında belirgin bir fark görülmektedir. Bu durum yatay ve düşey levhaların sıklaştığı durumların etkinliğini göstermektedir. Levha sayısındaki artış deformasyonu belirgin bir şekilde kontrol altına almış ve gerilmeler için olumlu bir katkı sağlamıştır. Levha miktarlarındaki artışın sonuçları aynı şekilde 17.5m ve 25m çaplarına sahip modellerin grafiklerinde de karşılaşılmıştır. Bu durumda yatay levhalı sistemlerin düşey levhalar ile birlikte kullanıldığı takdirde daha ekonomik çözümler üretilebileceği düşünülmektedir.

Farklı silo çaplarındaki eşdeğer kombinasyonların karşılaştırılması irdelenerek küçük çaptaki modellerin büyük çaptaki versiyonlarına kıyasla daha rijit kaldıkları ve deformasyonlarının sınırlandırıldığı görülmüştür. Levha boyutlarının silo çapları değişmesine rağmen modeller arasında farklılaşmamasından kaynaklı olarak deformasyon grafiklerindeki bu durum daha net görülebilmektedir. Kullanılan levha genişliğinin ve cidarının hizmet ettiği levha çapına göre göreceli olarak küçük kaldığı, başka bir ifade ile ataletçe yetersiz kaldığı sonucu çıkarılabilir.

Çap küçüldükçe silo cidarındaki deformasyonlar daha lineer bir çizgide hareket etmekte, çap artışı görüldükçe silo cidarındaki deformasyonların zikzaklı bir dağılım gösterdiği grafiklerde görülmektedir. Silo cidarındaki zikzaklı dağılımın önüne geçebilmek için levha genişliğinin çap değişimine göre hesaplanan uygun bir orantıda artırılması önerilmektedir. Bundan dolayıdır ki eğer bu tip düşey ve yatay levhalar ile sistem güçlendirilmesi yapılmak istenirse çap değerindeki artış ile orantılı olarak levha geometrik boyutlarında da artışa gidilmesi gerekmektedir. Bu durum göz önüne alındığında silo çapının değiştiği durumlarda rijitleştirme levhalarının boyutlarında da bir değişikliğe gidilip silo boyutlarına göre optimize edilmesi ekonomi ve levha etkinliği yönünden daha olumlu sonuçlar alınmasına olanak sağlayacaktır. Ancak levhaların beraber kullanıldığı durumlarda sağlamış olduğu fayda levha boyutlarının yanı sıra levha sayısı ile de değiştirilebildiği için levha sayısı ve boyutlarındaki değişimlerin birlikte yapılması durumunun daha avantajlı olacağı düşünülmektedir.

Yapılan bu çalışmada su/yapı etkileşimi statik olarak analiz edilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda, etkinin dinamik olarak analiz edilmesinin yapı davranışının yapı güvenliği açısından değerlendirilmesi için daha verimli sonuçların elde edileceği düşünülmektedir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Özel, K.(2007). Çelik Hububat Silolarının Tasarım Esasları, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya Selçuk Üniversitesi.
- [2] Dogangun, A., Karaca, Z., Durmus, A. & Sezen, H.(2009). Cause Of Damage And Failures İn Silo Structures. *Journal Of Performance Of Constructed Facilities*, 23(2), 65-71.
- [3] Kuczyńska, N., Wójcik, M. & Tejchman, J.(2015). Effect Of Bulk Solid On Strength Of Cylindrical Corrugated Silos During Filling.*Journal Of Constructional Steel Research*, 115, 1-17.
- [4] Akyildiz, H., Ünal, N.E. & Taylan, B.(2012). Rijit Silindirik Bir Tankta Sıvı Çalkantısının Deneysel İncelenmesi. *İMO Teknik Dergi*, 6089-6112
- [5] Brar, G. S. & Singh, S. (2014). An Experimental and CFD Analysis of Sloshing in a Tanker. *Procedia Technology – ICIAME*.
- [6] Akyildiz, H. & Unal, E. (2005). Experimental Investigation of Pressure Distribution on a Rectangular Tank due to Liquid Sloshing. *Ocean Engineering*, 32(11-12): 1503-1516.
- [7] Sanapala, V., M., R., Velusamy, K. & Patnaik, B. (2018). Numerical Simulation of Parametric Liquid Sloshing in a Horizontally Baffled Rectangular Container. *Journal of Fluids and Structures*, pp. 229-250.
- [8] Akyildiz, H. & Unal, N. E. (2006). Sloshing in a Three-Dimensional Rectangular Tank: Numerical simulation and experimental validation. *Ocean Engineering*, 33(16): 2135-2149.
- [9] Armenio, V. & La Rocca, M. (1996). On the Analysis of Sloshing of Water in Rectangular Containers: Numerical Study and Experimental Validation. *Ocean Engineering*, 23(8): 705-739.
- [10] Altun, H. A. & Gedikli, A. (2013). Sesimic Analysis of Steel Liquid Storage Tanks by API-650” (Doctoral dissertation, M. Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, Structural Engineering Programme, Istanbul Technical University, Graduate School of Science Engineering and Technology)
- [11] Panigrahy, P., Saha, U. & Maity, D. (2009). Experimental Studies on Sloshing Behavior due to Horizontal Movement of Liquids in Baffled Tanks. *Ocean Engineering*, pp. 213-222.
- [12] Zang, Q., Fang, H., Liu, J. & Lin, G.(2019). Boundary element model for investigation of the effects of various porous baffles on liquid sloshing in the two dimensional rectangular tank. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 484-500.
- [13] Efe, M. E., Çelik, İ. D., Kocaman, T. B., Arslan, K. Y. (2020). Rijitleştirme Levhalı Sıvı Depolama Tankının Yapısal Davranışının Dalga Yüğü Altında İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(2), 296-303.
- [14] Ansys Workbench, ANSYS, Inc.
- [15] Efe, M. E. (2020). Hidrodinamik Etki Altındaki Silo Tipi Çelik Yapıların Sıvı Çalkantısına Bağlı Yapısal Davranışın İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü/ İnşaat Mühendisliği, Süleyman Demirel Üniversitesi.